

激光与光电子学进展

胶印专色油墨混合颜色光谱预测研究

刘易仁^{1*}, 万晓霞^{1**}, 牟竟晓¹, 史太川²

¹武汉大学印刷与包装系, 湖北 武汉 430079;

²深圳劲嘉集团股份有限公司, 广东 深圳 518105

摘要 针对传统 Kubelka-Munk(K-M)理论的光谱预测模型在进行胶印专色油墨光谱预测时精度不够理想的问题, 提出一种基于分段线性插值法构建基墨数据库, 结合 Stearns-Noechel(S-N)传递函数修正 K-M 模型的胶印专色油墨混合颜色光谱预测方法。研究以盛威科品牌某一系列专色油墨混合得到的 64 个专色作为目标色样进行训练, 分别进行两色、三色、四色混合光谱预测研究, 得到了 3 种数量基墨混合时最佳纸基权重分别为 -0.5 、 -0.1 、 0.2 。将最佳纸基权重代入预测模型, 以 CIE1976 色差、CIEDE2000 色差和均方根误差为评价指标, 随机选取了两色、三色、四色已知配方的专色各 3 个进行精度检测实验。结果表明, 提出的方法与传统 K-M 方法相比, CIE1976 色差、CIEDE2000 色差和均方根误差平均值分别从 5.748、3.471 和 0.048 降低到 2.077、1.441 和 0.011。该方法相比传统 K-M 方法预测精度大幅提高, 能够较好地实现更高精度的胶印油墨混合颜色的光谱预测。

关键词 可见光谱; 计算机配色; Kubelka-Munk 理论; 线性插值法; 胶印油墨

中图分类号 O436.2; TS801.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0733002

Research on Prediction of Mixed Spectra of Offset Printing Spot Color Ink

Liu Yiren^{1*}, Wan Xiaoxia^{1**}, Mou Jingxiao¹, Shi Taichuan²

¹School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

²Shenzhen Jinjia Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518105, China

Abstract Aiming at the problem that the accuracy of the traditional Kubelka-Munk(K-M) theory spectral prediction model is not ideal when performing offset printing spot color ink spectrum prediction, a color spectrum prediction method for offset printing spot color ink is proposed by constructing a base ink database based on piecewise linear interpolation method, combined with modifying the K-M model with the Stearns-Noechel(S-N) transfer function. The study used 64 spot colors obtained by mixing a certain series of spot color inks of Siegwerk brand as the target color samples for training, carried out two-color, three-color, and four-color mixed spectrum prediction research respectively, and obtained three quantities of primary color inks when mixed. The optimal paper-based weights are -0.5 , -0.1 , 0.2 , respectively. Bringing the best paper-based weight into the prediction model, and using CIE1976 color difference, CIEDE2000 color difference and root mean square error(RMSE) as evaluation indicators, two, three, and four-color spot colors with known formulas were randomly selected for accuracy testing experiments. The experimental results show that compared with the traditional K-M method, the CIE1976 color difference, CIEDE2000 color difference and RMSE of the method proposed in this study are reduced from 5.748, 3.471 and 0.048 to 2.077, 1.441 and 0.011, respectively. Compared with the traditional K-M method, the

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-03; 录用日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61575147)

通信作者: *2015301750038@whu.edu.cn, **wan_wuhu@hotmail.com

prediction accuracy of this method is greatly improved, and it can better realize the spectrum prediction of the mixed color of offset printing ink with higher accuracy.

Key words visible spectrum; computer color matching; Kubelka-Munk theory; piecewise linear interpolation; offset printing ink

1 引言

计算机配色技术是一种结合光度学、色度学等多个学科知识的应用型技术,利用高精度分光光度计对颜色进行测量获得光谱数据,再通过数学模型对光谱数据进行处理,可以解决复杂的配色问题,提高企业配色生产效率从而减少废弃色料的产生,近些年该技术在涂料、纺织、印染等领域得到迅速发展。对于计算机配色技术而言,建立准确的颜色预测模型来描述基色组分比例与混合颜色光谱之间的对应关系至关重要^[1]。

目前的颜色预测模型主要分为实验模型和理论模型两大类,前者是通过特定的实验数据训练出来的,而后者是根据光在混合物中传播的特点模拟出来的^[2]。Stearns等^[3]提出的Stearns-Noechel(S-N)模型就是直接从经验数据导出的实验模型,主要用于纺织领域;随着机器学习技术的发展,另一类基于人工神经网络(ANN)的实验模型^[4-5]也诞生了,该类模型需要隐藏层建立从混合颜料配方输入层到多维光谱反射率数据输出层的映射关系,通过已知配方样本进行训练。理论上,S-N和ANN实验模型准确性相比理论模型更高,但构建这两种模型需要大量的实验样本,并且不同基色材料的映射关系各不相同,实际应用效果也并不一定优于理论模型^[6],因此其还没有在油墨混合研究领域广泛使用。Kubelka-Munk(K-M)理论模型是广义辐射传递理论的双通量方法^[7],描述了光在无限厚度半透明及透明材料之间传播的规律,自提出以来一直是颜料混合颜色预测研究中应用最广泛的模型。Wei^[8]通过胶印油墨混合颜色预测实验对传统K-M模型进行精度验证,实验结果表明平均色差没有达到工业标准要求,因此传统K-M理论的颜色预测模型应用于油墨混合颜色研究时需要优化修正,同时基墨光谱数据库的准确性对预测精度影响也比较大。随后,Yang和Kruse等^[9-11]也通过数学理论推导和纸张染色实验对传统K-M模型进行深入研究,认为其并不适用于油墨与纸张混合的应用场景,为此从理论上对模型进行一定修正,但未对修正后的预测模型进行实际应用验证。

本文以胶印专色油墨为研究对象,引入纺织领域的S-N传递函数对传统K-M理论光谱预测模型进行优化修正,并考虑到基材、基墨数据库对预测精度的影响,通过迭代法筛选不同基色数量配方对应的最佳基材权重系数,同时使用分段线性插值法取代传统单段最小二乘法来保存基墨数据库,从而构建了针对胶印专色油墨的颜色预测模型,有效提高了胶印油墨印刷品颜色光谱预测的精度。

2 胶印专色油墨混合颜色预测模型的建立

2.1 颜色预测模型

2.1.1 S-N模型

S-N模型传递函数可表示为

$$T(R_\lambda) = (1 - R_\lambda) / [(M(R_\lambda - 0.01) + 0.01)], \quad (1)$$

式中: $T(R_\lambda)$ 为中间传递值, R_λ 为某波长对应的光谱反射率; M 为经验参数,受样品纤维类型、纤维细度和密度等因素影响。

2.1.2 K-M理论模型

K-M理论模型是油墨混合颜色预测研究中应用最广泛的理论模型,K-M理论简式可表示为

$$\frac{K_\lambda}{S_\lambda} = \left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = \frac{(1 - R_\lambda)^2}{2R_\lambda}, \quad (2)$$

式中: R_λ 、 K_λ 、 S_λ 分别为混色颜料某波长处对应的光谱反射率、吸收系数和散射系数。目前,在油墨混合颜色预测方面的模型大多都是基于K-M理论和Duncan^[12]加和性定理建立的,根据Duncan加和性定理,混合油墨的吸收系数、散射系数可以分别表示为单个组分的吸收系数、散射系数及其比例的线性组合,即所谓的双常数模型,具体可表示为

$$\begin{aligned} K_{\text{mix},\lambda} &= c_1 K_{1,\lambda} + c_2 K_{2,\lambda} + \dots + c_n K_{n,\lambda}, \\ S_{\text{mix},\lambda} &= c_1 S_{1,\lambda} + c_2 S_{2,\lambda} + \dots + c_n S_{n,\lambda}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: c_i ($i=1, 2, \dots, n$)为基墨在混合物中的占比。然而在实际应用过程中,实现双常数模型需要结合许多样本进行非常复杂的科学计算^[13],研究人员在进行纤维混色研究时表示散射系数主要取决于纤维本身,与内部染料及颜料无关^[14],因此将2个光学系数 K 和 S 简化为单系数的吸收散射比 K/S ,也就有了单常数模型里的Duncan加和性公式

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\text{mix},\lambda} = c_1\left(\frac{K}{S}\right)_{1,\lambda} + c_2\left(\frac{K}{S}\right)_{2,\lambda} + \dots + c_n\left(\frac{K}{S}\right)_{n,\lambda} + m\left(\frac{K}{S}\right)_{\text{paper}}, \quad (4)$$

式中： m 为基材系数。单常数理论模型大大简化了实验复杂度，在混合颜色预测研究中取得了迅速的发展，本研究内容正是在该模型的基础之上建立的。

2.2 胶印油墨混合颜色光谱预测 K-M 修正模型

无论是以 K-M 为代表的理论模型还是以 S-N 为代表的实验模型，大多都是为了得到一个由光谱反射率数据转换的传递函数，建立一个可加性的模型，在 K-M 模型中传递函数如(2)式所示，在 S-N 模型中传递函数如(1)式所示，其中 K/S 和 $T(R_\lambda)$ 都属于中间传递值。

在胶印专色油墨配色过程中存在一个普遍现象：在实际光谱反射率较高(0.85 以上)的区域，K-M 理论模型预测得到的光谱反射率通常会比实际光谱反射率低，如图 1 所示。

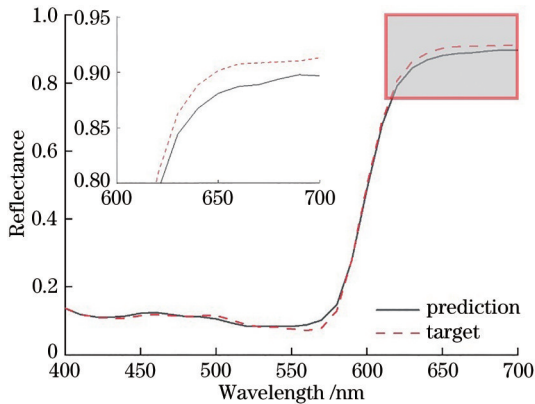


图 1 实际光谱与 K-M 理论模型预测的胶印油墨混合光谱
Fig.1 Actual spectrum and mixed spectrum of offset printing ink predicted by K-M theoretical model

然而光谱反射率 R 与吸收散射比 K/S 呈负相关，因此可以适当调整 K/S 与 R 的关系，使其在高光谱反射率区间对应的 K/S 值减小，或者使相同的 K/S 值对应的光谱反射率增大，理论上能有效改善上述问题。

为此，实验中比较了原始 K-M 公式以及 3 种 S-N 传递函数与光谱反射率之间的关系，如图 2 所示，其中 M 为(1)式中的常量。从图中可以看出传统 K-M 公式；S-N 传递函数与 R 的关系明显一致，并且相同的中间传递值可以得到较高的光谱反射率。

因此引入了纺织领域光谱预测的 S-N 模型对

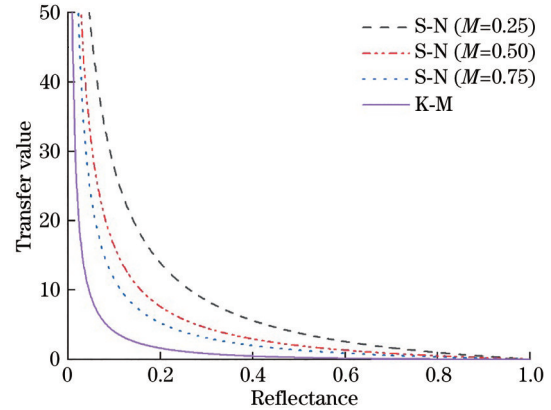


图 2 不同模型下传递值与光谱反射率的关系

Fig.2 Relationship between transmission value and spectral reflectance under different models

K-M 单常数理论公式进行修正。随后发现用 S-N 模型中 $T(R_\lambda)$ 作为 K-M 单常数理论公式的传递函数时可以通过合适的 M 值改善图 1 所述问题。笔者利用某印刷企业实际生产中的胶印专色油墨配方和对应光谱数据对(1)式中常量 M 求最优解^[15]，得到 M 为 0.50。随后得到修正 K-M 传递公式与 R 之间的转换关系，具体可表示为

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = T(R_\lambda) = (1 - R_\lambda) / (0.5R_\lambda + 0.005). \quad (5)$$

为使公式更加准确，对(5)式中常量 0.005 进行调整，在 -0.01 至 0.02 范围内皆以 0.001 为步长迭代，解得在 0.01 时误差最小，因此本实验最终使用的 K-M 修正公式为

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = (1 - R_\lambda) / (0.5R_\lambda + 0.01). \quad (6)$$

本研究提出的 K-M 修正公式结合 Duncan 加和性理论公式构成了新的胶印油墨光谱预测模型。

2.3 分段线性插值法拟合建库

目前大多数研究者所用的光谱正向预测模型中使用最小二乘法对基墨数据进行归一化处理，建立基墨数据库^[16]，具体可表示为

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n [Y_i - f(x_i, w_i)]^2, \quad (7)$$

式中： Y_i 为某种基墨的光谱数据转换的 K/S 数据， $f(x_i, w_i)$ 为该数据的拟合函数，具体可表示为

$$f(x, w) = [x_1, x_2, \dots, x_m] [w_1, w_2, \dots, w_m]^T, \quad (8)$$

式中： $[x_1, x_2, \dots, x_m]$ 为某种波长对应不同浓度梯度的 K/S 数据； $[w_1, w_2, \dots, w_m]$ 为待定项参数。当(7)式中 ΔE 达到最小时对应的 $[w_1, w_2, \dots, w_m]$ 即为所求参数。

传统归一化建库方法是取所有浓度梯度(0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 62.5%, 75%, 87.5%, 100%)样条经过最小二乘法得到对应每一波长的单一拟合线段,用该线段代替实际基墨数据库。区别于归一化方法的是,本次实验取 0、15%、30%、50%、75%、100% 六个数据分别

进行线性插值拟合得到(0, 15%)、(15%, 30%)、(30%, 50%)、(50%, 75%)、(75%, 100%)的 K/S 数据。利用已打样的 5%、10%、20%、25%、40%、62.5%、87.5% 梯度 K/S 数据与传统归一化方法和分段线性插值法拟合得到的该部分梯度 K/S 数据进行比较,其中射光蓝(Blue1)具体结果如图 3 所示。

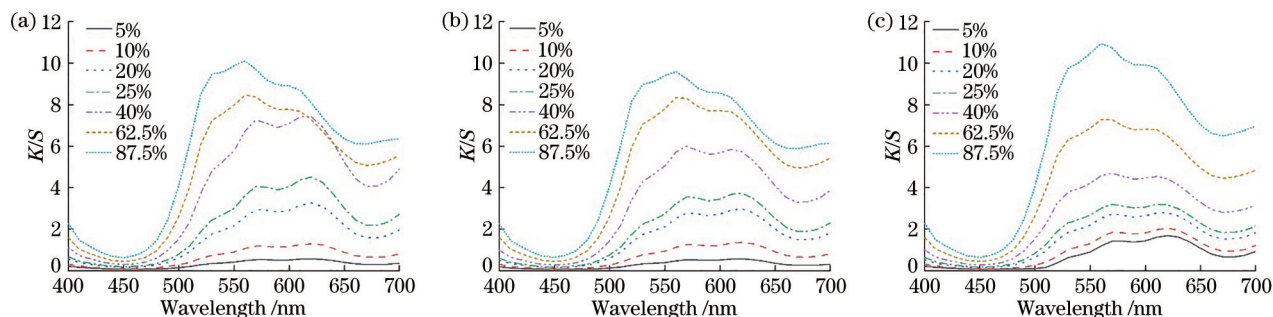


图 3 射光蓝基墨不同浓度 K/S 数据比较。(a)实际 K/S ; (b)分段线性插值法 K/S ; (c)传统归一化方法 K/S
Fig. 3 Comparison of K/S data with different concentration for Blue1 primary ink. (a) Real K/S ; (b) K/S by piecewise linear interpolation; (c) K/S by traditional normalization method

由图 3 可知,通过分段线性插值法建立的基墨数据拟合得到的 K/S 数据相比传统归一化方法得到的 K/S 数据整体上更加接近真实打样数据,尤其在低浓度范围更加明显,这表明通过分段线性插值法构建的基墨数据库不仅减少了需打样的梯度数据,还具有更高的拟合精度。仅以 550 nm 波长处的某品红色基墨为例,新提出的分段线性插值法、传统归一化方法得到的 K/S 数据和实际打样 K/S 数据之间的关系,如图 4 所示。从图中可以看出,传统归一化方法以及分段线性插值法构建的数据库都可以模拟出 0~100% 对应基墨浓度 c 的 K/S 数据,但本文提出的分段线性插值法构建的基墨 K/S 数据更接近于实际打样值。

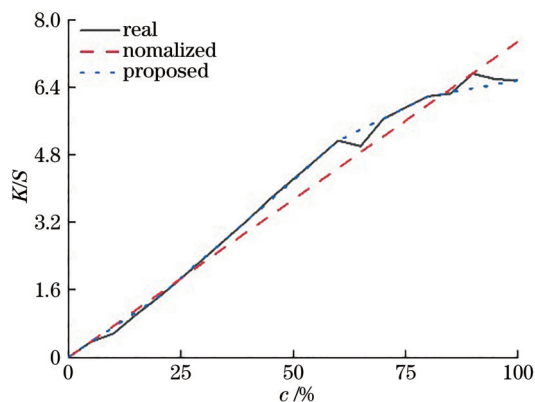


图 4 550 nm 品红墨不同浓度 K/S 数据比较
Fig. 4 Comparison of K/S data with different concentration for 550 nm Magenta ink

3 实验

3.1 实验材料和仪器

实验仪器:印刷适性仪 IGT-Amsterdam(荷兰厂商 IGT),高速匀墨试验仪 IGT-HSIU4(荷兰厂商 IGT),水浴箱 IGT-Accel250LC(荷兰厂商 IGT),紫外固化试验仪 IGT-Aktiprint Mini 2-1(荷兰厂商 IGT),分光光度计 X-Rite Ci6x(精度 $0.05\Delta E_{ab}$, ΔE_{ab} 为 CIE1976 色差^[17],美国厂商 X-Rite),色彩质量控制软件 X-Rite Color iQC(美国厂商 X-Rite),分析天平 OHAUS-Adventurer(精度:0.00001 g,美国厂商 OHAUS),调墨刀(铁铝合金制品),白色盛墨碗(陶瓷制品)。

实验材料:基墨(德国厂商 Siegwerk)包括“射光”蓝(Blue1)、“四色”蓝(Blue2)、“耐晒”黄(Yellow)、“金”红(Red1)、“四色”黑(Black)、“大红”(Red2)、“四色”红(Red3);纸张(中国厂商 SunPaper)为 200 g/m^2 非涂布白卡纸。

测量几何条件: $d/0$ (漫射照明,垂直接收);光源和视场:D65 标准光源, 10° 视场;打样实验条件:印刷速度为 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,印刷压力为 500 N,上墨量(最终转移到纸张上的油墨质量)为 0.08 g,温度为 $22\sim 24\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 $50\%\sim 55\%$ 。

3.2 基础油墨数据库的构建

将基墨与冲淡剂分别按照基墨质量浓度:0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%,

62.5%, 75%, 87.5%, 100% 进行混合, 称量 5 g 后使用调墨刀先在白色调墨碗中初步匀墨, 再从碗中称取 1.75 g 油墨于高速匀墨试验仪上匀墨 2 min。油墨混合均匀后通过印刷适性仪对白卡纸样条打样, 再利用紫外固化试验仪对样条进行烘干, 采用分光光度计测量不同浓度样条的光谱反射率, 采样波段为 400~700 nm, 间隔为 10 nm, 上中下左右五点各间隔 1 cm 测量, 取五点平均值录入基墨梯度数据库, 其中 0, 15%, 30%, 50%, 75%, 100% 梯度数据用于构建基墨数据库, 5%, 10%, 20%, 25%,

40%, 62.5%, 87.5% 梯度数据用于检验基墨数据库精度。

3.3 目标色选取

在本次实验中选取的目标色来源于某印刷企业实际生产过程中的专色, 记录配方对应的油墨和基材与本次实验一致。分别选取两色、三色、四色基墨混合目标色各 3 个。配方如表 1 所示, 其中, Sample 1~3 为两色混合专色样, Sample 4~6 为三色混合专色样, Sample 7~9 为四色混合专色样。

表 1 目标色中各种基墨的质量百分比

Table 1 Mass percentage of each base color ink in the target color

unit: %

Primary ink	Sample								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Blue1	-	-	-	-	-	-	27.03	-	-
Blue2	-	-	57.69	-	5.26	32.26	54.05	-	-
Yellow	-	-	-	22.22	-	-	-	-	80.64
Red1	-	82.67	-	-	-	-	-	9.71	9.72
Black	9.09	-	42.31	33.33	31.58	35.48	8.11	7.49	2.37
Red2	90.91	17.33	-	-	63.16	-	-	76.85	7.27
Red3	-	-	-	44.45	-	32.26	10.81	5.95	-

3.4 评价指标

在色度数据对比分析过程中, 色度精度指标通常采用 CIE1976 色差 $\Delta E_{ab}^{[17]}$ 和 CIE2000 色差 $\Delta E_{00}^{[18]}$, 2 种指标取值都恒大于 0, 结果越接近 0 说明色差越小, 2 种颜色越接近。

在光谱数据对比分析过程中, 光谱精度指标通常采用光谱均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和光谱拟合度系数 (goodness of fit coefficient, GFC)^[19], 2 种指标取值范围都为 0~1, RMSE 可以描述光谱数值之间的平均接近程度, GFC 可以描述光谱曲线的近似程度, 两者相辅相成。RMSE 的计算公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(\lambda)_i - R'(\lambda)_i)^2}, \quad (9)$$

式中: $R(\lambda)_i$ 和 $R'(\lambda)_i$ 分别为目标光谱和预测光谱某一波长下的光谱反射率, n 取值为 31 表示 400~700 nm 波长数据。RMSE 越小说明两者光谱数据差异越小, 预测精度越高。

GFC 的计算公式为

$$C_{GF} = \frac{\sum_{i=1}^{31} (R(\lambda)_i \times R'(\lambda)_i)}{\left[\sum_{i=1}^{31} (R(\lambda)_i^2) \right]^{1/2} \times \left[\sum_{i=1}^{31} (R'(\lambda)_i^2) \right]^{1/2}}, \quad (10)$$

式中: $R(\lambda)_i$ 和 $R'(\lambda)_i$ 分别为目标光谱和反推光谱某一波长下的光谱反射率。 C_{GF} 越接近 1 说明目标光谱曲线与反推光谱曲线越接近, 当 $C_{GF} > 0.9999$ 时可以认为两者几乎一致。

皮尔森 (PEARSON) 相关系数是一种线性相关系数, 其取值在 -1~1 之间, 越接近 1 说明两例数据相关性越强^[20], 本实验中目标光谱和反推光谱之间的相关系数计算公式为

$$R_{PEARSON} = \frac{S(R(\lambda), R'(\lambda))}{\sigma(R(\lambda)) \times \sigma(R'(\lambda))}, \quad (11)$$

式中: $R(\lambda)$ 和 $R'(\lambda)$ 分别为目标光谱和反推光谱数据, $S(R(\lambda), R'(\lambda))$ 表示 $R(\lambda)$, $R'(\lambda)$ 的协方差, $\sigma(R(\lambda))$ 为 $R(\lambda)$ 的标准差。

4 实验数据处理与分析

4.1 分段线性插值法光谱还原精度比较

为对分段线性插值法建立的基墨数据库的有效性进行验证, 现将分段线性插值法与传统归一化方法得到的吸收散射比数据 (如图 3 所示) 还原成对应的梯度光谱数据。由于分段线性插值法构建基墨数据库是通过 0, 15%, 30%, 50%, 75%, 100% 梯度数据建立的, 现将 5%, 10%, 20%, 25%, 40%,

62.5%, 87.5% 梯度的 7 种基墨光谱数据作为参考, 将对应浓度的 K/S 数据通过(5)式的逆运算, 得到基墨对应的光谱反射率数据, 具体可表示为

$$R_{\lambda} = \frac{1 - 0.01 \times (\frac{K}{S})_{\lambda}}{1 + 0.5 \times (\frac{K}{S})_{\lambda}} \quad (12)$$

将两种方法得到的梯度光谱数据与真实打样

测量的基墨梯度光谱数据进行比较, 以 RMSE、GFC、PEARSON 相关系数作为评价指标, 结果如表 2 所示。

表 2 中, Proposed 对应分段线性插值法结果, Normalized 对应传统归一化方法。其中 Red2 实际光谱功率分布曲线与分段线性插值法、传统归一化方法反推得到基墨光谱功率分布曲线如图 5 所示。

表 2 基墨数据库实际光谱与两种方法反推光谱比较

Table 2 Comparison of actual spectrum of the base ink database and deduced spectra of the methods (K-M and Proposed)

Primary ink	R_{MSE}		C_{GF}		$R_{PEARSON}$	
	Proposed	Normalized	Proposed	Normalized	Proposed	Normalized
Blue1	0.0055	0.0228	0.9999	0.9968	0.9998	0.9976
Blue2	0.0062	0.0263	0.9998	0.9974	0.9997	0.9983
Yellow	0.0046	0.0101	1.0000	0.9999	0.9999	0.9997
Red1	0.0043	0.0152	0.9999	0.9993	0.9998	0.9985
Black	0.0022	0.0254	0.9999	0.9997	0.9872	0.9734
Red2	0.0036	0.0182	1.0000	0.9990	0.9999	0.9986
Red3	0.0050	0.0192	0.9999	0.9988	0.9998	0.9966

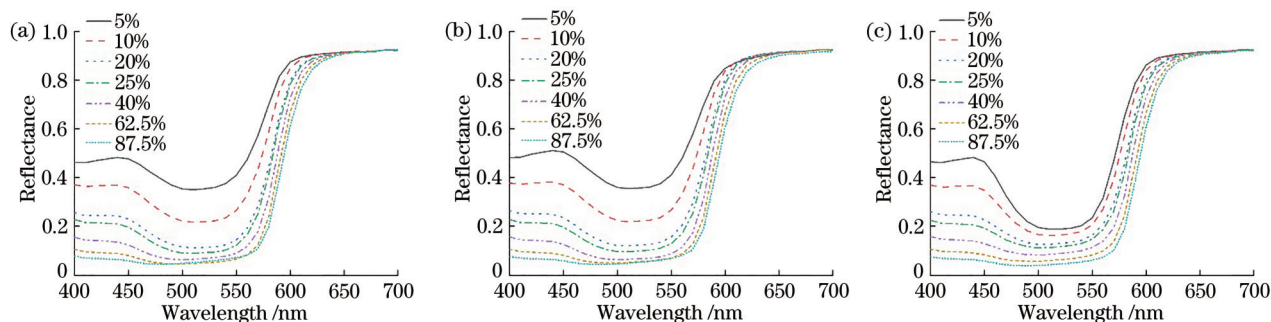


图 5 Red2 基墨三种梯度光谱曲线图。(a) 实际光谱; (b) 分段线性插值法反推光谱; (c) 传统归一化方法反推光谱

Fig. 5 Three gradient spectrum curves of Red2 primary ink. (a) Real spectra; (b) deduced spectra by piecewise linear interpolation; (c) deduced spectra by traditional normalization method

由表 2 可知, 本文提出的五点两段法反推得到的基墨光谱数据与原始数据谱的差异更小, 光谱拟合程度更高, 相关系数更高, 因此通过该方法打样建立基墨数据库不仅可以大幅提高打样效率, 同时得到的基墨 K/S 数据也更能代表原始数据的真实性。

4.2 Duncan 加和性公式基材系数求解

胶印油墨在实际混合配色过程中需要基材(一般为纸张)作承印物, 并且由于混合后墨层厚度有限, 基材在对混合样本进行光谱测量时具有一定的影响^[21]。因此, 将 Duncan 加和性公式运用于胶印专色油墨配色时, 需要考虑基材光谱反射率对实际配色结果的影响。传统 Duncan 加和性公式将(4)式中基材系数 m 设为常数 1, 本研究发现在不同种类数量的基墨混合

得到的配色结果中, 基材系数值对于配色精度存在影响, 初步分析是因为油墨混合时随着油墨种类的增加, 不同颜料间的混合干扰了基材对于混合结果的影响程度。为此, 对基材系数与基墨种类数量之间的关联性进行探究, 由于胶印油墨实际生产过程中最常见的是两色、三色和四色混合, 本研究选取了实际生产过程中已知油墨配方的两色混合专色(23 个)、三色混合专色(29 个)、四色混合专色(12 个)共计 64 个专色对该基材系数 m 进行迭代计算, m 的迭代区间为 $[-1.5, 1]$, 步长设为 0.1。不同权重情况下修正算法的预测平均谱差结果如图 6 所示。

结果表明, 当 m 分别为 $-0.5, -0.1, 0.2$ 时, 两色、三色、四色混合的光谱差异最小, 光谱预测精度最高。说明在预测多种基墨混合的过程中, 随着基

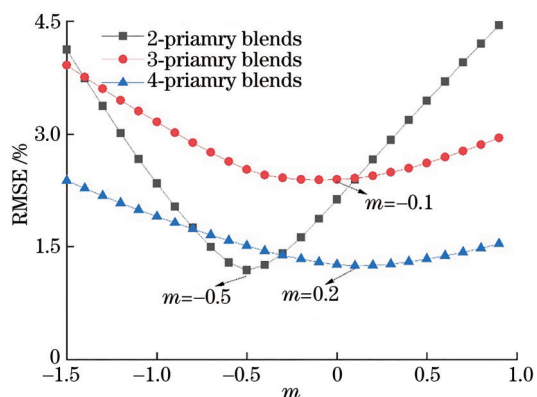


图 6 两色、三色和四色油墨混合时 m 值的确定

Fig. 6 Determination of m values for 2-, 3- and 4-primary ink blends respectively

墨种类数的增加, 基材系数应该做出相应的改变以适应多种基墨混合的影响, 才能得到更加准确的预测光谱。

4.3 胶印油墨混合光谱预测精度比较

本研究提出的胶印专色油墨配色光谱预测模型, 是经过已知专色配方和光谱反射率的样本迭代以谱差最小为约束条件得到的模型。结合“分段线性插值法”建立基墨数据库的方案, 现对随机选取的 9 种已知配方和光谱反射率的专色目标色进行光谱预测精度的检验, 即将本研究提出的光谱预测模型同 K-M 单常数理论结合 Duncan 加和性公式 ($m=1$) 的常用模型进行比较, 将两种模型得到的 K/S 数据通过 (4) 式和 (12) 式的函数关系得到预测光谱, 两种模型预测光谱与实际目标色光谱如图 7 所示, 其中图 7(a)~7(c) 为两色混合专色, 图 7(d)~7(f) 为三色混合专色, 图 7(g)~7(i) 为四色混合专色。色差、谱差等对比数据如表 3 所示,

由图 7 可知, 本文提出方法、传统 K-M 单常数方法在光谱反射率较低区域的预测数据与实际目

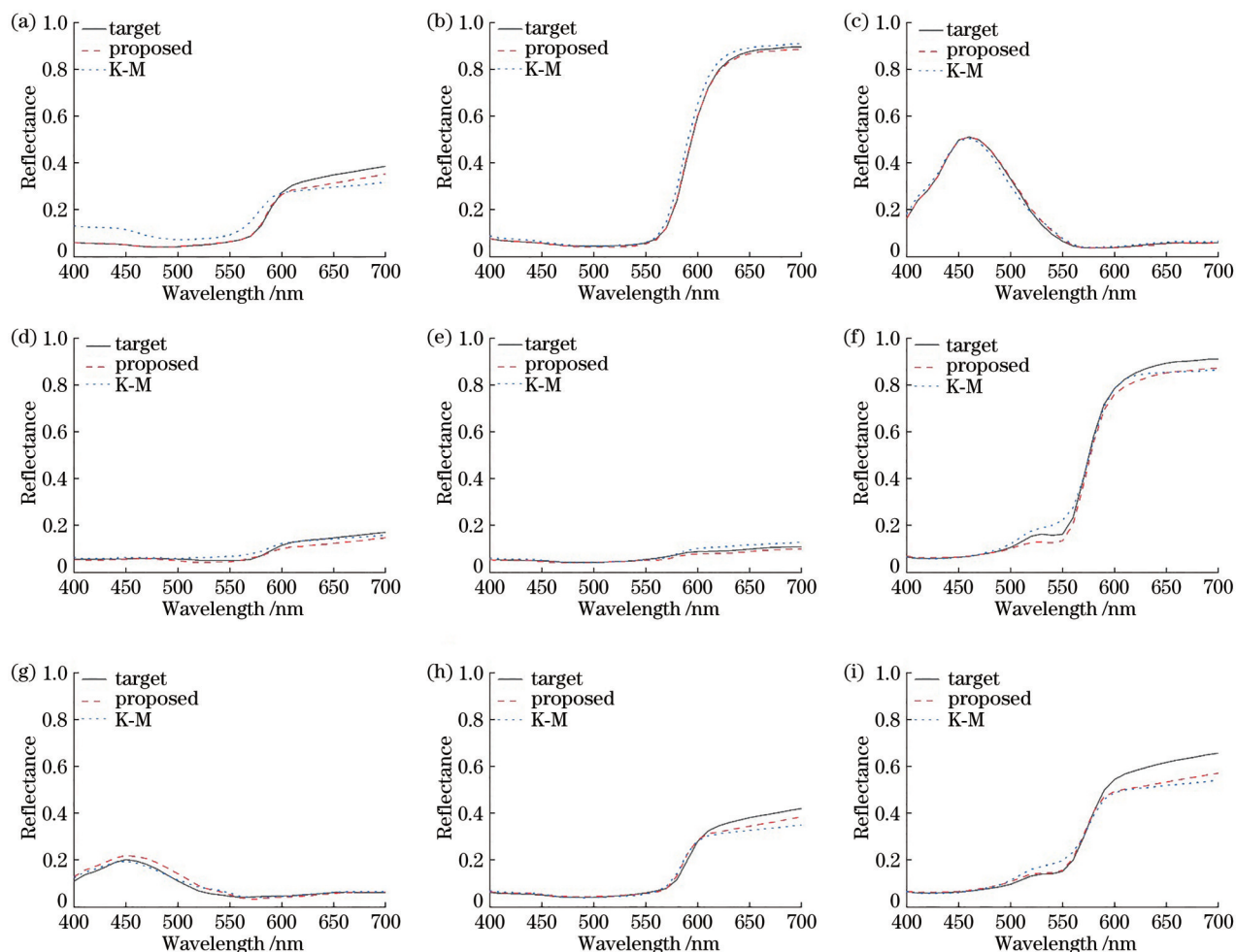


图 7 两种模型预测光谱与实际样本光谱比较。(a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4; (e) sample 5; (f) sample 6; (g) sample 7; (h) sample 8; (i) sample 9

Fig. 7 Comparison of predicted spectra by two methods and actual sample spectra. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4; (e) sample 5; (f) sample 6; (g) sample 7; (h) sample 8; (i) sample 9

表 3 两种基于油墨的混合光谱预测模型精度比较
Table 3 Comparison of the accuracy of two ink-based mixed spectrum prediction models

Sample	ΔE_{ab}		ΔE_{00}		R_{MSE}	
	K-M	Proposed	K-M	Proposed	K-M	Proposed
1	16.768	0.890	9.140	0.732	0.052	0.007
2	2.143	1.707	1.836	0.860	0.023	0.007
3	1.943	1.433	0.868	1.006	0.012	0.012
4	4.885	2.823	4.019	2.033	0.010	0.011
5	3.808	1.612	3.095	1.228	0.010	0.006
6	5.151	1.078	3.035	0.707	0.221	0.018
7	5.405	5.083	2.823	4.212	0.008	0.009
8	2.203	2.570	0.944	1.687	0.032	0.012
9	9.423	1.501	5.477	0.504	0.060	0.018
Average	5.748	2.077	3.471	1.441	0.048	0.011

标色数据都较为接近,但在其他光谱反射率范围内本文提出方法的精度相比传统 K-M 单常数方法会有不同程度的提升。由表 3 可知,以平均色差 $\Delta \bar{E}_{ab}$ 为评价标准的情况下,本文提出方法的色差 $\Delta \bar{E}_{ab}$ 为 2.077,相比传统 K-M 单常数方法的 5.748,平均色差缩小了 63.87%;以平均色差 $\Delta \bar{E}_{00}$ 为评价标准的情况下,本文提出方法的色差为 1.441,相比传统 K-M 单常数方法的 3.471,平均色差缩小了 58.48%;以谱差 RMSE 为评价标准的情况下,本文提出方法的平均谱差为 0.011,相比传统 K-M 单常数方法的 0.048,平均谱差缩小了 77.08%。故本研究提出的光谱预测模型的预测精度相比 K-M 单常数模型在胶印专色油墨混合领域有较大改善,尤其从预测结果的谱差表现来看,谱差有较大幅度的缩小。

5 结 论

基于 K-M 单常数理论改进了胶印专色油墨混合颜色光谱的预测算法,在对基墨的梯度光谱数据进行转换时引入线性插值法分段处理,弥补了传统方法不能较好地拟合真实光谱数据的缺陷,同时考虑到油墨承印物纸基对混合结果的影响,调整了加和性公式的纸基权重,提高了预测精度。在实验过程中,将本文提出方法预测光谱和实际光谱的色差、谱差结果与传统方法的预测结果进行比较。结果表明,基于分段线性插值法建立的胶印油墨基础数据库,油墨混合颜色光谱预测模型可以大幅度提高对胶印专色油墨的混合颜色光谱预测精度,进一步地丰富了油墨的光谱预测研究,为计算机油墨配色的应用研究提供了一种参考方法。

参 考 文 献

- [1] Wei C N, Wan X X, Li J F. Color prediction model for pre-colored fiber blends based on modified Stearns-Noechel function[J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 147: 544-551.
- [2] Wei C N, Wan X X, Li J F. A modified single-constant Kubelka-Munk model for color prediction of pre-colored fiber blends[J]. *Cellulose*, 2018, 25(3): 2091-2102.
- [3] Stearns E, Noechel F. Spectrophotometric prediction of color of wool blends[J]. *American Dyestuff Reporter*, 1944, 33(9): 177-180.
- [4] Wang Q, Shuai L G, Dai X Z, et al. PSO-BP neural network-based gelatin hollow capsule color matching model[C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), October 13-16, 2020, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2020: 94-99.
- [5] Hemingray C, Westland S. A novel approach to using neural networks to predict the colour of fibre blends[J]. *Coloration Technology*, 2016, 132(4): 297-303.
- [6] Westland S, Iovine L, Bishop J M. Kubelka-Munk or neural networks for computer colorant formulation? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4421: 745-748.
- [7] Chandrasekhar S. *Radiative transfer*[M]. North Chelmsford: Courier Corporation, 2013.
- [8] Wei Y C, Chou W M, Chen C L. The performance of computerized spectrum color matching based on Kubelka-Munk theory and its color rendering on offset ink sets[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 174: 72-76.
- [9] Yang L, Kruse B. Revised Kubelka-Munk theory. I: theory and application[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(10): 1933-1941.
- [10] Yang L, Kruse B, Miklavcic S J. Revised Kubelka-Munk theory. II: unified framework for homogeneous and inhomogeneous optical media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(10): 1942-1952.
- [11] Yang L, Miklavcic S J. Revised Kubelka-Munk theory. III: a general theory of light propagation in scattering and absorptive media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(9): 1866-1873.
- [12] Duncan D R. The colour of pigment mixtures[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1940, 52(3):

- 390-401.
- [13] Davidson H R, Hemmendinger H. Color prediction using the two-constant turbid-media theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(8): 1102-1109.
- [14] Burlone D A. Theoretical and practical aspects of selected fiber-blend color-formulation functions[J]. Color Research & Application, 1984, 9(4): 213-219.
- [15] Li R, Song Y, Gu F, et al. A spectrophotometric color matching algorithm for precolored fiber blends[J]. Color Research & Application, 2009, 34(2): 108-114.
- [16] Wang X C, Hua Z, Gong Y J, et al. Color difference weight computer color matching based linear database [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1224-1228.
王喜昌, 华臻, 宫严军, 等. 基于线性数据库的色差权重因子计算机配色 [J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1224-1228.
- [17] Fang L L, Wan X X, Lü W, et al. Optimized design of method for establishing basic spectrum database of computer color matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 063301.
方丽丽, 万晓霞, 吕伟, 等. 计算机配色光谱基础数据库建立方法的优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 063301.
- [18] Luo M R, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000[J]. Color Research & Application, 2001, 26(5): 340-350.
- [19] Fang X Y, Wan X X, Shi S, et al. Multispectral color data dimension reduction model research based on sparse representation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2230003.
方新怡, 万晓霞, 史硕, 等. 基于稀疏表示的多光谱颜色数据降维方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2230003.
- [20] Li S, Han Y D, Wang S, et al. Algorithm for eliminating mismatched points based on Pearson correlation coefficient[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810025.
李硕, 韩迎东, 王双, 等. 基于 Pearson 相关系数的图像误匹配点剔除算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810025.
- [21] Mou J X, Lü W. Effect of backing on spot-color ink matching accuracy[J]. Packaging Journal, 2019, 11(5): 76-84.
牟竞晓, 吕伟. 背衬对计算机配色精度的影响[J]. 包装学报, 2019, 11(5): 76-84.